

УДК 669.184.124.3.001.57

Сущенко А.В.¹,
Евченко В.Н.²**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ
ТЕМПЕРАТУРНОГО
ПОЛЯ ФУТЕРОВКИ КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА***Разработана математическая модель тепловой работы футеровки кислородного конвертера, которая может быть использована при решении ряда актуальных задач конвертерного производства стали.*

При решении ряда актуальных задач кислородно-конвертерного производства, таких как оптимизация параметров шихтовки плавки, в т.ч. в условиях неритмичной работы агрегатов, определение термических напряжений в материалах футеровки и металлическом корпусе при разработке мероприятий по повышению их стойкости и др., возникает необходимость в информации о динамике температурного поля футеровки конвертера в процессе его эксплуатации.

Температурное поле футеровки конвертера формируется в результате сложного нестационарного теплообмена в системе "рабочее пространство агрегата – футеровка – окружающая среда". В процессе эксплуатации конвертера непрерывно изменяются как граничные условия теплообмена в системе (вследствие изменения технологических операций, ориентации агрегата в пространстве, температуры окружающей среды и т.п.), так и характеристики самой футеровки (изменение толщины, теплофизических свойств материалов и т.п.). Исследование влияния различных технологических и др. факторов на динамику температурного поля футеровки конвертера наиболее эффективно осуществлять с использованием функционально-детерминированных математических моделей, адаптируемых к реальным условиям работы конкретного агрегата путем проведения локальных натурных замеров.

При разработке математической модели основывались на следующих положениях и допущениях. Различные участки футеровки конвертера могут быть изготовлены из различных материалов, имеют различные начальные толщины, скорости износа и условия теплообмена. В связи с этим вся футеровка была условно разбита на M характерных участков по высоте агрегата с учётом их расположения относительно сторон выпуска металла и слива шлака. Это позволило для каждого участка решать одномерную задачу нестационарной теплопроводности (по толщине футеровки) со своими условиями однозначности, изменяющимися во времени в соответствии с видом текущей технологической операции (обжиг футеровки, межплавочный простой, завалка лома, заливка чугуна, продувка плавки и т.д.):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right),$$

(1)

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = K_{\Sigma} (T|_{x=0} - T_{oc}),$$

(2)

$$T|_{x=\delta} = T_b(\tau),$$

¹ ПГТУ, ст. науч. сотр.² ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

$$(3) \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = q_{в,\Sigma},$$

$$(4) \quad T \Big|_{\tau=0} = T_{oc},$$

(5) где T – температура футеровки; τ - время; ρ , c , λ - плотность, теплоемкость и теплопроводность материала футеровки; x – текущая координата по толщине футеровки (δ) с началом координат на наружной поверхности последней; T_{oc} – температура окружающей среды (ОС).

Коэффициент теплопередачи от наружной поверхности футеровки к ОС – $K_{н,\Sigma}$ определяли с учетом возможного наличия дополнительного теплоизоляционного слоя толщиной $\delta_{из}$ и воздушного зазора между корпусом конвертера и футеровкой

$$K_{н,\Sigma} = 1 / (1/\alpha_{н,\Sigma} + \delta_k/\lambda_k + \delta_{из}/\lambda_{из} + 1/\alpha_{воз,\Sigma}),$$

$$(6)$$

где $\alpha_{н,\Sigma}$ – суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением от наружной поверхности корпуса в ОС; λ_k , $\lambda_{из}$ – коэффициенты теплопроводности металлического корпуса и теплоизоляционного слоя соответственно; $\alpha_{воз,\Sigma}$ – приведенный коэффициент теплопередачи излучением и теплопроводностью от наружной поверхности футеровки к внутренней поверхности корпуса (через воздушный зазор).

При граничных условиях теплообмена 1-го рода на внутренней поверхности футеровки конвертера величину $T_b(\tau)$ задавали как функцию времени в зависимости от вида текущей технологической операции: при обжиге футеровки – в соответствии с действующим графиком обжига (по показаниям термопары, замурованной в лёточное отверстие); при контакте с заваленным ломом – по температуре лома (с учетом незначительной длительности операции принимали равной T_{oc}); при контакте с заливаемым чугуном – по температуре чугуна $T_{ч}$; при контакте с расплавом в процессе продувки плавки – по температуре расплава T_p , линейно увеличивающейся от $(T_{ч} - \Delta T_1)$ до температуры металла в конце продувки – T_m , где ΔT_1 – снижение температуры чугуна до начала продувки в результате охлаждающего действия лома.

Средняя температура поверхности шлака в процессах выпуска металла и слива шлака из конвертера была принята соответственно как $T_{ш} = (T_m - \Delta T_2)$ и $T_{ш} = (T_m - \Delta T_3)$, а температура отходящих запыленных газов в процессе продувки плавки – $T_r = (T_p + \Delta T_4)$. Величины $\Delta T_1 \div \Delta T_4$ задавали на основе опытно-промышленных данных.

Плотность результирующего теплового потока на внутреннюю поверхность некоторого j -го участка футеровки – $q_{в,\Sigma}$ при граничных условиях теплообмена 3-го рода определяли по выражениям:

- при заливке чугуна

$$q_{в,\Sigma} = \sigma_0 \varepsilon_j \left\{ \varepsilon_{ч} \varphi_{j,ч} [T_{ч}^4 - (T|_{x=\delta})_j^4] + \sum_{i=1}^M \varphi_{j,i} \varepsilon_i [(T|_{x=\delta})_i^4 - (T|_{x=\delta})_j^4] \right\}, \quad (7)$$

- при продувке плавки

$$q_{в,\Sigma} = \sigma_0 \varepsilon_j \varepsilon_r [T_r^4 - (T|_{x=\delta})_j^4],$$

$$(8)$$

- при выпуске металла и сливе шлака

$$q_{в,\Sigma} = \sigma_0 \varepsilon_j \left\{ \varepsilon_{ш} \varphi_{j,ш} [T_{ш}^4 - (T|_{x=\delta})_j^4] + \varphi_{j,0} [T_{oc}^4 - (T|_{x=\delta})_j^4] + \sum_{i=1}^M \varphi'_{j,i} \varepsilon_i [(T|_{x=\delta})_i^4 - (T|_{x=\delta})_j^4] \right\},$$

$$(9)$$

$$q_{в,\Sigma} = \sigma_0 \varepsilon_j \left\{ \varepsilon_{ш} \varphi'_{j,ш} [T_{ш}^4 - (T|_{x=\delta})_j^4] + \varphi_{j,0} [T_{oc}^4 - (T|_{x=\delta})_j^4] + \sum_{i=1}^M \varphi''_{j,i} \varepsilon_i [(T|_{x=\delta})_i^4 - (T|_{x=\delta})_j^4] \right\}$$

, (10)

- при межплавочных простоях, завалке лома

$$q_{в,\Sigma} = \sigma_0 \varepsilon_j \left\{ \varphi_{j,0} [T_{oc}^4 - (T|_{X=\delta})_j^4] + \sum_{i=1}^M \varphi_{j,i}''' \varepsilon_i [(T|_{X=\delta})_i^4 - (T|_{X=\delta})_j^4] \right\} + \alpha_{в,к} k_b [T_{oc} - (T|_{X=\delta})_j]$$

, (11)

$$q_{в,\Sigma} = \sigma_0 \varepsilon_j \left\{ (\varphi_{j,0} + \varphi_{j,л}) [T_{oc}^4 - (T|_{X=\delta})_j^4] + \sum_{i=1}^M \varphi_{j,i}^{IV} \varepsilon_i [(T|_{X=\delta})_i^4 - (T|_{X=\delta})_j^4] \right\} + \alpha_{в,к} k_b [T_{oc} - (T|_{X=\delta})_j],$$

(12)

где σ_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; $\varepsilon_ч$, $\varepsilon_{ш}$, ε_j , ε_i – степени черноты чугуна, шлака, j-го и i-го участков футеровки соответственно; $\varphi_{j,ч}$, $\varphi_{j,ш}$, $\varphi_{j,ш}'$, $\varphi_{j,0}$, $\varphi_{j,i}$, $\varphi_{j,i}'$, $\varphi_{j,i}''$, $\varphi_{j,i}'''$, $\varphi_{j,л}$, $\varphi_{j,i}^{IV}$ – угловые коэффициенты для расчета лучистого теплообмена между j-ым участком футеровки и другими элементами системы (определяли по [1,2] с учетом свойств взаимности и замыкаемости); $\alpha_{в,к}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией от внутренней поверхности футеровки к воздуху, находящемуся в рабочем пространстве конвертера; k_b – адаптационный коэффициент, учитывающий отличие температуры воздуха внутри конвертера от T_{oc} .

В процессе плавки (от начала заливки чугуна до окончания слива шлака из конвертера) конвективную составляющую теплообмена в рабочем пространстве конвертера не учитывали из-за малой её величины по сравнению с лучистой. При определении коэффициентов конвективной теплоотдачи в уравнениях (6), (11) и (12) учитывали ориентацию агрегата в пространстве и использовали известные критериальные зависимости вида

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \cdot \varepsilon,$$

(13)

где Nu , Gr , Pr – критерии Нуссельта, Грасгоффа и Прандтля соответственно; C , n , ε – справочные эмпирические коэффициенты [2].

Величину скорости износа футеровки задавали на основе промышленных данных. Степень черноты запыленных конвертерных газов ε_r была принята равной 1.

Учитывая нелинейный характер рассматриваемой задачи, определяемый зависимостью теплофизических свойств материалов футеровки и воздуха от температуры, а так же нелинейными граничными условиями теплообмена в системе, разработанную модель решали с использованием численных методов (итерационной конечно-разностной схемы) на ПЭВМ.

При адаптации модели к реальным условиям работы 350 т конвертеров ОАО "МК "Азовсталь" были использованы данные экспериментальных исследований¹⁾ температурного поля футеровки конвертера в процессе его эксплуатации: в различных точках по высоте и толщине стен агрегата было установлено 54 термодатчиков ХА и ХК с непрерывной регистрацией показаний многоточечными потенциометрами КСП-4.

В качестве примера, на рисунке приведены результаты расчета динамики температурного поля в 350 т конвертере МК "Азовсталь" в процессе кампании по футеровке в характерные моменты времени плавов при следующих условиях: а) объект – нижняя часть стен со стороны лётки; б) толщина рабочего (периклазоизвесткового) и арматурного (хромитопериклазового) слоев футеровки – 1000 мм и 350 мм соответственно; в) интенсивность работы конвертера – 8 и 4 плавов в смену (средняя длительность межплавочного простоя – 30 мин. и 90 мин. соответственно); г) средняя скорость износа футеровки – 2 мм/плавку; д) после 250-ой плавки имеет место длительный простой продолжительностью 12 часов. Периодичность вывода результатов расчёта – через каждые 50 плавов; при длительном простое – через 1 час.

¹⁾В работе принимали участие: Ганошенко В.И., Буга И.Д., Алабушев Е.А., Ковура А.Б. и др.

Выводы

Разработана и адаптирована к производственным условиям конвертерного цеха МК "Азовсталь" функционально-детерминированная динамическая математическая модель тепловой работы футеровки кислородного конвертера. Модель позволяет получать информацию о динамике температурного поля в различных (характерных) участках футеровки агрегата на любых этапах его эксплуатации и может быть использована при решении различных прикладных задач конвертерного производства (оптимизация шихтовки плавки с учётом теплового состояния футеровки конвертера, определение термических напряжений в огнеупорах и др.).

Перечень ссылок

1. *Кутателадзе С.С.* Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. - М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
2. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент.: Справочник под общ. ред. *Григорьева В.А., Зорина В.М.* – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.

Сущенко Андрей Викторович. Заведующий отделом математического моделирования и оптимизации теплотехнологических процессов и агрегатов ПНИЛ, окончил Мариупольский металлургический институт в 1984 г. Основные направления научных исследований - математическое моделирование и энергооптимизация теплотехнологических процессов и систем; разработка и внедрение энергоресурсосберегающих технологий металлургического производства.

Евченко Виталий Николаевич. Заведующий кафедрой ПТЭУиТ ПГТУ, окончил Ждановский металлургический институт в 1973 г. Основные направления научных исследований - гидрогазодинамика и тепломассообмен в теплотехнологических системах.